

Оценка гидролого-климатически обусловленной продуктивности экосистем юго-востока Западной Сибири

С. Г. КОПЫСОВ, А. О. ЕЛИСЕЕВ

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, Томск, пр. Академический, 10/3
E-mail: wosypok@mail.ru; kuzoller@gmail.com*

Статья поступила 17.08.2023

После доработки 25.09.2023

Принята к печати 18.10.2023

АННОТАЦИЯ

Пространственная разнонаправленность климатических изменений обуславливает необходимость создания прогнозных моделей состояния растительного покрова. Предлагаемое нами решение для пространственного моделирования биопродуктивности природных экосистем создает основу для дальнейшей количественной оценки потенциального поглощения CO₂, что в настоящее время считается одной из наиболее актуальных экологических задач. В предлагаемой работе с помощью методов геоанализа условий произрастания отработана оригинальная технология моделирования потенциального распространения биоценозов и их продуктивности, отражающая внутренний аттрактор развития биоценозов под влиянием локальных гидролого-климатических условий их произрастания. Методика реализована для территории юго-востока Западной Сибири в рамках общедоступной ГИС Saga на основе цифровой модели рельефа и данных климатического реанализа WorldClim 2.0. Для прогноза данных на период третьего десятилетия XXI в. использовался региональный климатический прогноз В. В. Паромова на основе адаптивной модели – метода экспоненциального сглаживания. Верификация результатов моделирования выполнялась на основе базы данных “Продуктивность экосистем Северной Евразии”. В результате получены пространственно-распределенные данные в виде растров с высоким пространственным разрешением для среднемноголетней потенциальной биопродуктивности по данным реанализа за 1970–2000 гг. и спрогнозированным данным на период 2021–2030 гг. Выявлена как положительная, так и отрицательная тенденция потенциальной биопродуктивности для различных природных зон юго-востока Западной Сибири, обусловленная пространственной разнонаправленностью изменения теплоэнергетических ресурсов и атмосферных осадков по территории. В целом наблюдаемое потепление на достаточно дренированных территориях способствует увеличению биологической продуктивности агро- и биоценозов, а на переувлажненных – к ее уменьшению.

Ключевые слова: биопродуктивность, ландшафтно-экологическое моделирование, метод ГКР, ступени увлажнения, WorldClim, юго-восток Западной Сибири.

ВВЕДЕНИЕ

Продуктивность экосистем, или биопродуктивность, отражает способность продуцентов накапливать солнечную энергию в виде органического вещества в соответствии

с ландшафтно-гидролого-климатическими условиями местообитания. Биопродуктивность в сочетании с социально-экономическими факторами определяет экологическую емкость территории в рамках теории самодостаточного

(устойчивого) развития. Пространственное моделирование биопродуктивности природных экосистем создает основу для дальнейшей количественной оценки ассимиляции CO_2 , что в настоящее время считается одной из наиболее актуальных экологических задач.

Многочисленными современными исследованиями выявлено, что взаимосвязи характеристик растительного покрова и данных дистанционных измерений носят локальный характер. Это обусловлено пространственной изменчивостью спектрально-отражательных характеристик растительного покрова, что затрудняет спутниковое картографирование растительности больших территорий. Для решения этой проблемы используются современные методы классификации с обучением, но и такие подходы не эффективны в случае, если разные классы, находящиеся в удаленных друг от друга регионах, имеют схожие спектрально-отражательные характеристики.

В современный период происходит энергичное развитие динамического (численного, имитационного) моделирования травяных, агро- и лесных экосистем, и количество моделей уже исчисляется сотнями [Чертов и др., 2019]. Для замены традиционных приемов оценки агроклиматических ресурсов и районирования территорий с помощью комплексных агроклиматических показателей на имитационное моделирование биопродуктивности многие исследователи [Брыксин и др., 2010] используют модель EPIC (Environmental Policy Integrated Climate) [Williams, 1997] в совокупности с данными дистанционного зондирования Земли. Основная проблема заключается в отсутствии данных, необходимых для корректной работы столь подробных моделей. Кроме того, многие параметры моделей могут существенно меняться со временем. Поэтому использование таких моделей для крупных региональных исследований на сегодняшний день представляется проблематичным.

С другой стороны, при проведении наземных геоботанических исследований [Жукова и др., 2010] для оценки экологических особенностей местообитаний растений используются экологические шкалы Д. Н. Цыганова (содержат 23 ступени увлажнения), Э. Ландольта (разработаны для растений флоры Швейцарии и содержат пять ступеней увлажнения), Г. Элленберга (для Средней Европы, 15 ступеней увлажнения), Л. Г. Раменского (в рамках прикладных геоботанических исследований сенокосов и пастбищ).

Экологические шкалы используются исключительно в среде ботаников и в явном виде не пригодны для моделирования динамики гидролого-климатического режима, т. е. для водно-балансовых исследований по базовым климатическим и ландшафтным характеристикам. Однако нам [Korysov et al., 2018] удалось решить эту проблему, совместив ступени увлажнения (СУ) по Л. Г. Раменскому [1938, 1971] с методом гидролого-климатических расчетов (ГКР) В. С. Мезенцева [1973].

Суммарное испарение воды органически связано с экологическими процессами в биоценозах, поэтому в основу предлагаемого нами алгоритма модели гидролого-климатической оценки потенциальной продуктивности и распространения биоценозов положен метод ГКР [Мезенцев, Карнацевич, 1969].

Уравнение, лежащее в основе метода ГКР, признано [Zhou et al., 2015] лучшим среди таковых, описывающих функциональную зависимость Будыко, как наиболее точное аналитическое решение уравнения водно-теплового баланса за средний многолетний период [Yang et al., 2008].

Цель исследований – отработка технологии определения гидролого-климатически обусловленной продуктивности экосистем на примере юго-востока Западной Сибири (Томская область до широты 60° с. ш., Новосибирская и Кемеровская области, а также Алтайский край) за период 1970–2000 и 2021–2030 гг. с верификацией по общедоступной геоботанической базе данных.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В основе предлагаемого исследования лежит полное разделение взглядов Л. Г. Раменского [1938] о том, что климат, рельеф, почвы и грунты, природные воды, растительность – все это элементы одной динамической системы, непрерывно влияющие друг на друга и преобразуемые хозяйственной деятельностью.

Исходя из своих взглядов, Л. Г. Раменский в рамках прикладных геоботанических исследований разработал классификацию местообитаний по двум грациям: степени и ха-

рактору увлажнения, а также по условиям минерального питания.

В природе относительная влажность разрыва капилляров (в долях от наименьшей влагоемкости почвы) в условиях оптимальной увлажненности отражает доступность влаги растениям, а в сочетании с условиями минерального питания определяет состав и структуру напочвенного покрова. Это позволяет связать значения ступеней увлажнения по шкале Л. Г. Раменского с почвенной (параметр r) и гидрологической (параметр n) компонентами экосистем, учитываемых в методе ГКР, через относительную влажность разрыва капилляров. Наглядно данная связь представлена на рис. 1.

В методе ГКР относительная влажность разрыва капилляров (V_{PK}) рассчитывается по формуле [Мезенцев, Карнацевич, 1969]:

$$V_{PK} = \left(\frac{r-1}{rn+1} \right)^{1/rn}, \quad (1)$$

где r – параметр, характеризующий способность почвогрунтов подводить влагу к испаряющей поверхности и расходовать ее на испарение, он зависит от механического состава и засоленности деятельного слоя.

Из вышесказанного следует, что за количественную характеристику растительного компонента экосистем можно принять увлажнение в ступенях (СУ) по шкале Л. Г. Раменского [Kopysov et al., 2018; Копысов и др., 2022]:

$$СУ = 100 \cdot \beta_H \cdot V_{PK} = 100 \cdot \beta_H \cdot \left(\frac{r-1}{rn+1} \right)^{1/rn}. \quad (2)$$

Здесь 100 – это число ступеней увлажнения в экологической шкале Л. Г. Раменского; β_H – коэффициент увлажнения, учитывающий несоответствие фактической увлажненности оптимальной увлажненности, который определяется отношением суммарного увлажнения H (мм/год) к водному эквиваленту теплоэнергетических ресурсов испарения Z_M (мм/год).

Биоценотический механизм адаптации экосистем к внешним воздействиям проявляется в первую очередь в пространственно-временной динамике растительного покрова, а затем и динамике почвенного покрова. В естественных условиях экосистемы находятся в состоянии динамического равновесия вещественно-энергетического обмена, характеризующегося отношением суммарного увлаж-

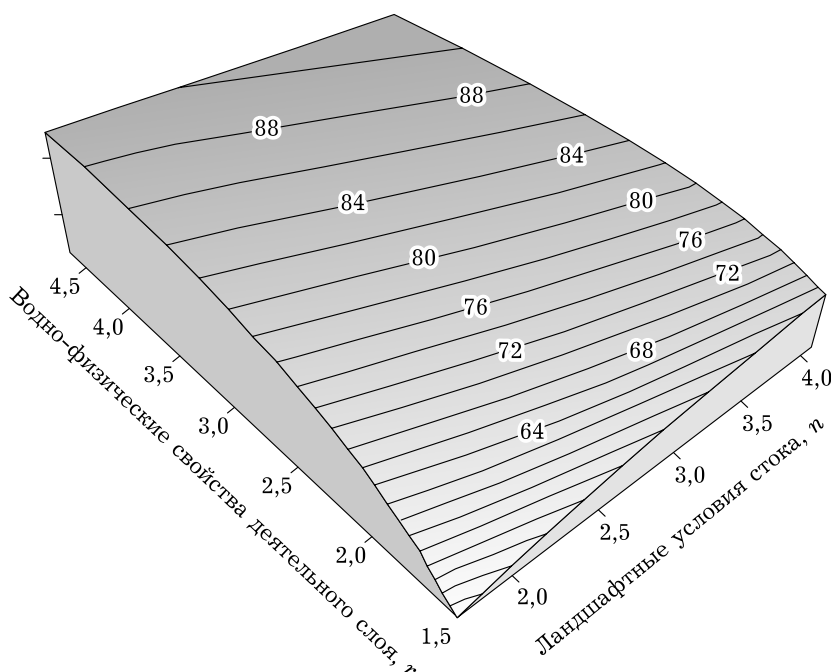


Рис. 1. Связь гидрологического, почвенного и растительного компонентов ландшафтов при оптимальной увлажненности ($\beta_H \approx 1$). Изолиниями нанесены ступени увлажнения

нения к водному эквиваленту теплоэнергетических ресурсов испарения.

Верхний оптимум соотношения тепла и влаги ($\beta_H = 1$) формируется на границе между южной тайгой и лесостепью. Нижний оптимум тепла и влаги, равный $\beta_H = 0,55$, сформировался между сухой степью и полупустыней. Ландшафты, оконтуренные этими изолиниями, наиболее благоприятны для жизнедеятельности населения [Дмитриева, Напрасников, 2012].

Для ландшафтного моделирования потенциальной биологической продуктивности экосистем (т/га) наиболее оптимальной является методика, предложенная и реализованная в работе В. Т. Дмитриевой и А. Т. Напрасникова (2012) для Забайкалья и Монголии. Их методика построена на обобщении информации о биологической продуктивности (БП) различных природных зон мира в связи с $\sum t_{>10}^{\circ\text{C}}$, отражающей поступление солнечной радиации, и коэффициентом увлажнения β_H [Дмитриева, Напрасников, 2012]:

$$\text{БП} = 0,004 \cdot \beta_H \cdot \sum t_{>10}^{\circ\text{C}} - 1. \quad (3)$$

Однако приведенная формула разработана для аридных территорий и не отражает того факта, что наибольшая биопродуктивность наблюдается при относительной увлажненности $\beta_H \approx 1$, характерной для перехода от лесостепного увлажнения к лесолуговому, т. е. $\text{СУ}_{\text{ОПТ}} = 64$. При более высокой влажности продуктивность будет снижаться по причине переувлажнения деятельного слоя почвы. Поэтому для расчета биопродуктивности не только аридных, но и гумидных экосистем формулу пришлось модернизировать [Мониторинг ..., 2022]:

$$\text{БП} = 0,0045 \cdot \left(1 - \text{abs} \left(\frac{\text{СУ}_{\text{ОПТ}} - \text{СУ}}{\text{СУ}_{\text{ОПТ}}} \right) \right) \times \sum t_{>10}^{\circ\text{C}} - 1. \quad (4)$$

Так как по результатам верификации биопродуктивности выяснено, что смоделированная биопродуктивность ниже измеренной, в пределах от 0 до 25 %, то решено в формуле (4) вместо коэффициента 0,004 использовать коэффициент 0,0045.

Последовательность выполнения модельных расчетов и их математические формулировки приведены на блок-схеме (рис. 2).

Информация для каждого блока данного алгоритма представляется в виде растровых карт: параметра ландшафтных условий стока воды (n), коэффициента инсоляции (CFT), водного эквивалента теплоэнергетических ресурсов испарения (Z_M); суммы температур воздуха выше $10^{\circ\text{C}}$ ($\sum t_{>10}^{\circ\text{C}}$), среднегодового количества осадков (X), коэффициента увлажнения ($k_{\text{увл}}$), суммарного увлажнения (H), потенциального распространения биоценозов по СУ и потенциальной биопродуктивности (БП).

Исходными данными для моделирования являлись: цифровая модель рельефа (SRTM-матрица с разрешением 30 м) [Farr et al., 2000] и климатические данные о среднемноголетних осадках и температуре воздуха (Климатический реанализ WorldClim 2.0 за период 1970–2000 гг.) [Fick, Hijmans, 2017].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Верификация результатов моделирования гидролого-климатической оценки потенциального распространения биоценозов и их продуктивности, реализованная в виде растровых карт, основывалась на данных из базы данных “Продуктивность экосистем Северной Евразии” [2006]. В ее основе лежат опубликованные и оригинальные (результаты полевых исследований) материалы, собранные и обобщенные в 70–90-е годы XX в. группой сотрудников лаборатории биогеографии Института географии РАН по инициативе и под руководством проф. Н. И. Базилевича [1993]. Ценность данной верификации снижает отсутствие точных координат площадок учета биопродуктивности, что вызывает неопределенность при оценке соответствия полевых и модельных данных. Поэтому для сравнения использовались диапазоны смоделированных ступеней увлажнения и биопродуктивности. Качественная оценка (рис. 3) соответствия измерений результатам моделирования говорит об относительной приемлемости результатов моделирования СУ. Для горных районов в используемом реанализе климатических данных имеет место недостаточно корректное отражение особенностей распределения осадков, что приводит к низкой достоверности результатов моделирования.

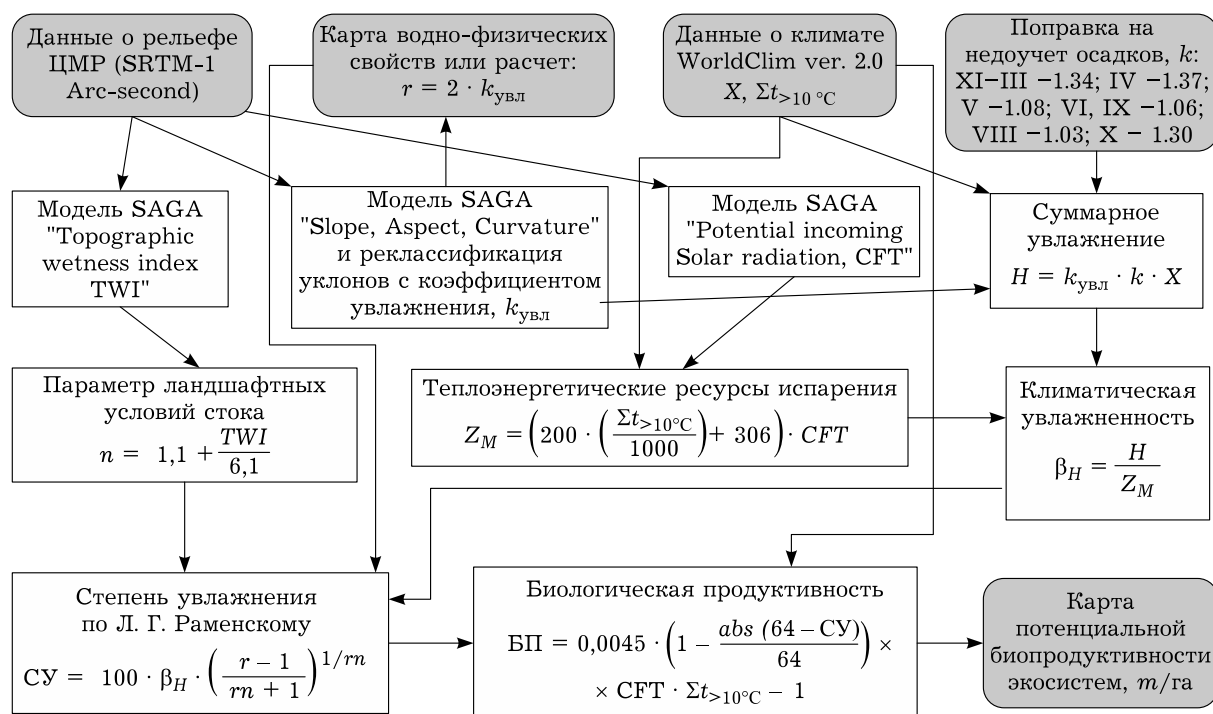


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета потенциального распространения биоценозов и их потенциальной биопродуктивности [Мониторинг..., 2022, с уточнениями]

Достоверность моделирования биопродуктивности на основе данных 60 пунктов верификации находится в диапазоне 0,42–0,60. Столь невысокие показатели обусловлены качеством исходных данных и рядом неучитываемых биологических ограничений (плодородие и засоленность почв, физиологические особенности преобладающей растительности).

На примере болот и осинников (рис. 4) очень хорошо заметна роль минерального питания, не учитываемого моделью. Для эвтрофных болот с богатым минеральным питанием продуктивность занижается, а для олиготрофных, наоборот, завышается. На достоверность верификации оказывает влияние также малое количество лет наблюдений, приводящее

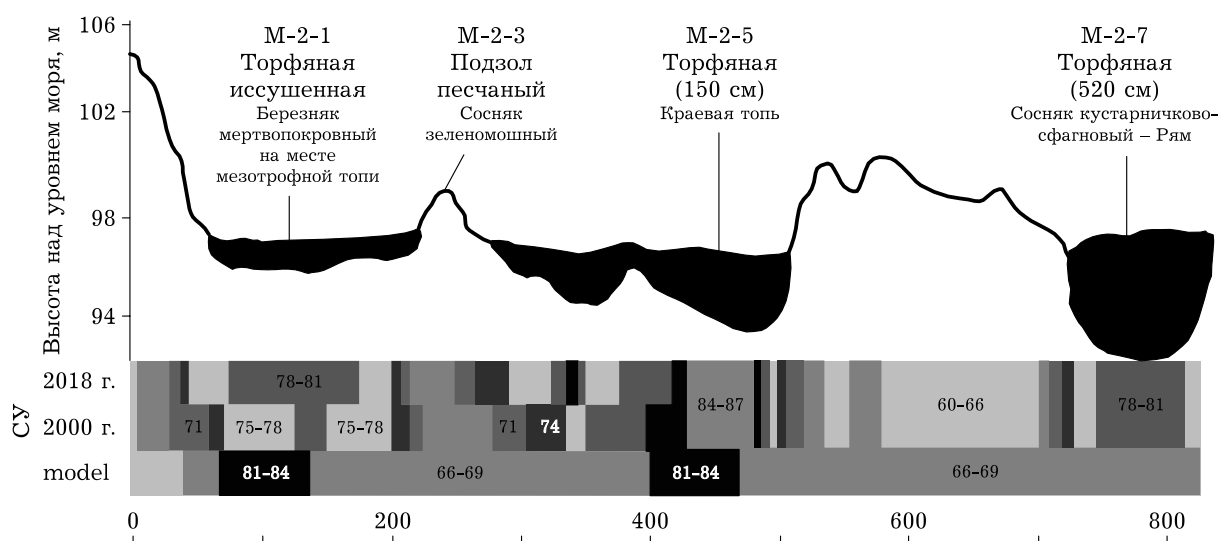


Рис. 3. Сравнение ступеней увлажнения (СУ) Л. Г. Раменского по ландшафтно-экологическому профилю [Kopysov et al., 2019] на основе полевых данных 2000 и 2018 гг. с модельными значениями (model)

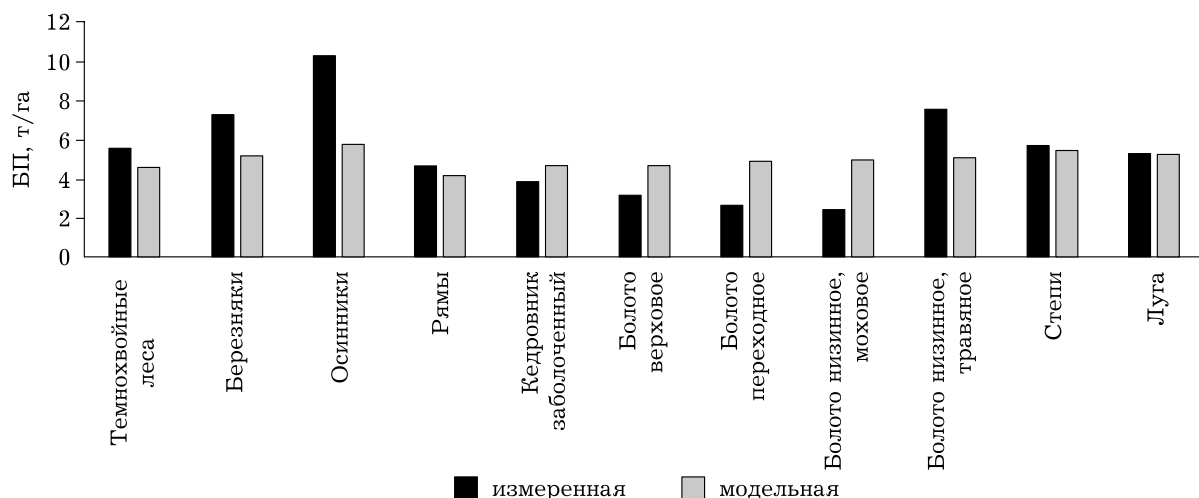


Рис. 4. Обобщенная верификация модели гидролого-климатической продуктивности (БП) по данным натурных измерений для юго-востока Западной Сибири

к несоответствию гидротермических условий периода наблюдений среднемноголетним условиям, используемым для расчетов.

Для прогноза экосистемных изменений на текущее десятилетие (2021–2030 гг.) для исследуемой территории использовались среднемноголетние значения температуры воздуха и атмосферных осадков, полученные В. В. Паромовым [2017] с помощью адаптивной модели – метода экспоненциального сглаживания, включающей линейный либо демпфирующий тренд.

На юго-востоке Западной Сибири отмечаемое потепление характеризуется ростом теплоэнергетических ресурсов (Z_M) на 3–5 % и атмосферных осадков (KX) на 7–11 %, что способствует росту потенциальной биопроductивности на достаточно дренированных сельскохозяйственных территориях. Однако на избыточно увлажненных территориях ожидается снижение биопроductивности по причине роста переувлажнения, так как в целом рост количества осадков превышает рост теплоэнергетических ресурсов. Региональные изменения отображены в таблице, отражающей изменения между базовым (рис. 5) и прогнозным (рис. 6) периодами.

На рис. 6 видно, что в прогнозный период 2021–2030 гг. северные и горные участки карты становятся светлее, что говорит о снижении биопроductивности в условиях роста избыточного увлажнения, характерного для этих территорий. В лесостепных районах, где наиболее развито сельское хозяйство, наблю-

дается рост гидролого-климатически обусловленной биопроductивности.

Для лесохозяйственных территорий ситуация иная. Годичный прирост древесины составляет примерно 20 % от потенциальной биопроductивности таежных биоценозов. В Томской области средний пророст древесины составляет 0,8 т/га (1,6 м³/га в год), который за счет увеличения переувлажнения лесов в текущем десятилетии снизится на 11,8 % (см. таблицу), т. е. до 0,7 т/га. Стоит отметить, что переувлажнение будет способствовать депонированию углерода в экосистемах.

Прогнозная оценка изменения растительного покрова не выходит за пределы современных границ растительного покрова по фактору увлажнения. Это подтверждает высокую адаптивность экосистем бореальной зоны Западной Сибири к климатическим изменениям, по крайней мере к тем, что ожидаются в текущем десятилетии (2021–2030 гг.).

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ результатов моделирования согласуется с выводами, приведенными в статье [Мезенцева и др., 2010], где показано отсутствие достоверного климатического тренда коэффициента увлажнения, а также получены разнонаправленные линейные тренды характеристик естественного увлажнения и теплообеспеченности, которые позволили им усомниться в однонаправленности

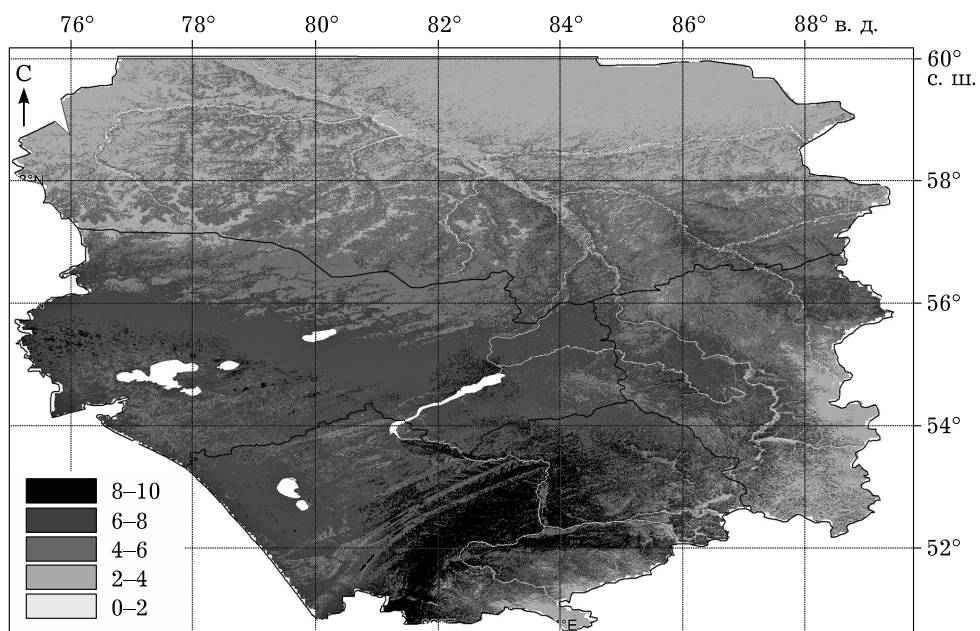


Рис. 5. Карта потенциальной гидролого-климатической биопродуктивности (т/га) за период 1970–2000 гг.

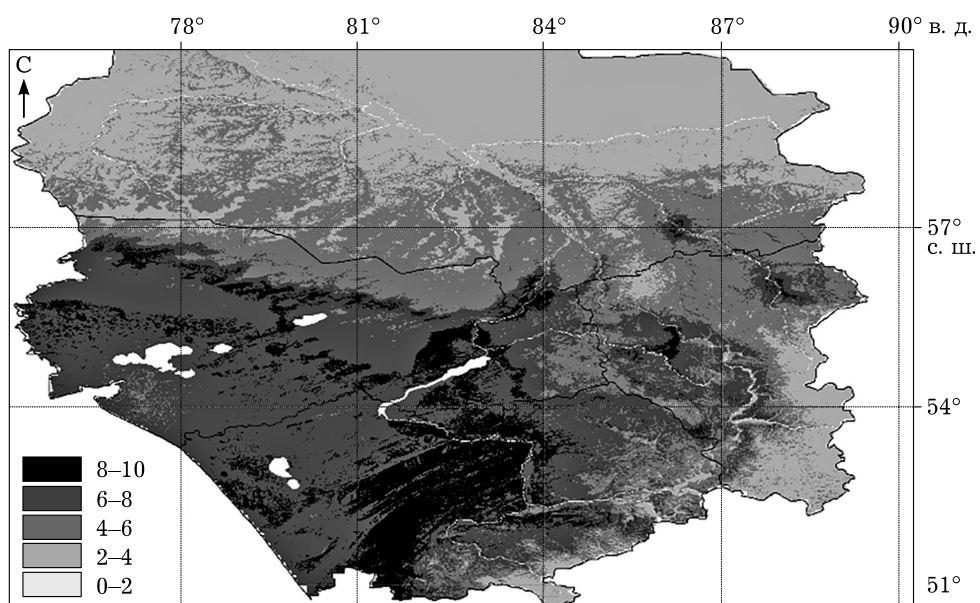


Рис. 6. Карта потенциальной гидролого-климатической биопродуктивности (т/га) на период 2021–2030 гг.

Прогноз экосистемных изменений по регионам юго-востока Западной Сибири

Регион	1970–2000 гг.				2021–2030 гг.				Δ , %			
	БП	СУ	Z _М	KX	БП	СУ	Z _М	KX	БП	СУ	Z _М	KX
Томская область	3,8	87	624	595	3,4	91	644	643	–11,8	4,4	3,1	7,5
Новосибирская область	6,5	62	686	468	6,9	64	724	508	5,8	3,1	5,2	7,9
Кемеровская область	5,1	76	630	675	4,9	82	658	751	–4,1	7,3	4,3	10,1
Алтайский край	7,1	61	734	540	7,1	66	757	606	0,0	7,6	3,0	10,9
Юго-восток Западной Сибири	5,4	73	666	562	5,0	77	692	616	–1,6	5,2	3,8	8,8

климатического процесса в последние десятилетия. Поэтому смещение границ растительных зон на ожидаемые 40–50 км пока не зафиксировано.

Устойчивости лесных экосистем способствует также продолжительность сукцессии. Так, время восстановления определяется условиями эдафотопы, биологическими особенностями лесобразующей породы и варьирует от 150 до 600 лет, что превышает длительность региональных (вековых и внутривековых) климатических циклов [Дюкарев и др., 2022].

Для Забайкалья В. Т. Дмитриева и А. Т. Напрасников [2012] также выявили высокую устойчивость ландшафтов, и особенно их биологической продуктивности, к внешним воздействиям. Это позволило им предположить, что сложившийся ландшафт будет сохранять свою жизнеспособность до тех пор, пока жесточайшие климатические условия, в том числе антропогенная деятельность, не уничтожат корневую систему растительности, а также и банк семян в почвенном покрове. По их мнению, гидротермический режим планеты обладает высоким потенциалом устойчивости, который ограничивает чрезмерные региональные флуктуации тепла и влаги.

Подобные результаты исследований согласуются с выводами В. Т. Горшкова [1994] о том, что единственным объяснением наблюдаемой устойчивости окружающей среды является функционирование естественной, ненарушенной человеком биоты, смысл существования которой заключается в поддержании оптимальных для жизни условий на основе действия биологического принципа Ле-Шателье.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом, за исключением некоторых нюансов, вызванных долговременными блокирующими антициклонами, наблюдаемое потепление на достаточно дренированных территориях благоприятно для увеличения биологической продуктивности агро- и биоценозов за счет роста теплоэнергетических ресурсов.

Наша прогнозная оценка изменения растительного покрова не выходит за пределы современных границ растительного покрова по фактору увлажнения. Это подтверждает высокую адаптивность экосистем бореальной зоны Западной Сибири к климатическим из-

менениям, по крайней мере к тем, что ожидаются в текущем десятилетии (2021–2030 гг).

Предложенная модель может использоваться для прогнозирования изменений биоценозов и их продуктивности в результате изменения климата и ландшафтных условий. Для более точного определения типа напочвенного покрова предстоит дополнительно разработать алгоритм учета местных особенностей минерального питания.

Результаты моделирования биопродуктивности на локальном уровне могут давать значительные ошибки, обусловленные особенностями принятых модельных решений, погрешностями в отражении реального рельефа, неточностью координатных привязок, неучетом особенностей минерального питания, а в горных районах и недостаточно корректным отражением особенностей распределения осадков в горных районах в используемом реанализе климатических данных. При переходе на более высокий уровень рассмотрения ошибки сглаживаются, и удается получить практически приемлемый интегральный результат.

Благодарности

Авторы выражают благодарность научным сотрудникам ИМЖЭС СО РАН канд. биол. наук Н. А. Черновой и Н. В. Климовой за совместную работу, позволившую разработать технологию моделирования потенциального распространения биоценозов, а также доценту Томского государственного университета канд. геогр. наук **В. В. Паромову** за краткосрочный климатический прогноз на текущее десятилетие.

Вклад авторов

Копысов С. Г. – постановка проблемы и теоретическая разработка модели, ее верификация; Елисеев А. О. – практическая реализация модели.

Финансирование

Исследование поддержано Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (госзадание Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН № FWRG-2022-0001 и № FWRG-2021-0003).

Соблюдение этических стандартов

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

Конфликт интересов

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Базилевич Н. И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.
- Брыксин В. М., Евтюшкин А. В., Рычкова Н. В. Прогнозирование урожайности зерновых культур на основе данных дистанционного зондирования и моделирования биопродуктивности // *Изв. Алт. гос. ун-та*, 2010. № 65. С. 89–93.
- Горшков В. Т. Термическая устойчивость климата // *Изв. РГО*. 1994. Т. 126, вып. 3. С. 23–34.
- Дмитриева В. Т., Напрасников А. Т. Методические аспекты определения биологической продуктивности аридных территорий // *Вест. Моск. гос. пед. ун-та. Серия: Естественные науки*. 2012. № 2 (10). С. 33–46.
- Дюкарев А. Г., Климова Н. В., Никифоров А. Н., Чернова Н. А., Копысов С. Г. Устойчивость лесных экосистем к изменениям климата // *Сиб. экол. журн.* 2022. Т. 29, № 3. С. 304–314. [Dyukarev A. G., Klimova N. V., Nikiforov A. N., Chernova N. A., Kopysov S. G. Resilience of Forest Ecosystems to Climate Change // *Contemporary Problems of Ecology*. 2022. Vol. 15, N 3. P. 304–314.]
- Жукова Л. А., Дорогова Ю. А., Турмухаметова Н. В., Гаврилова М. Н., Полянская Т. А. Экологические шкалы и методы экологического разнообразия растений. Йошкар-Ола: Мар. гос. ун-т, 2010. 368 с.
- Копысов С. Г., Елисеев А. О., Дюкарев А. Г. Оценка земель агрохозяйственных зон Томской области по результатам моделирования ступеней увлажнения // *Изв. Иркут. гос. ун-та. Серия: Науки о Земле*. 2022. Т. 41. С. 63–76.
- Мезенцев В. С. Расчеты водного баланса: учеб. пособие. Омск: Изд-во Омск. с.-х. ин-та, 1973. 80 с.
- Мезенцев В. С., Карнацевич И. В. Увлажненность Западно-Сибирской равнины. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 168 с.
- Мезенцева О. В., Карнацевич И. В., Березин Л. В. Исследования пространственно-временной динамики характеристик естественной тепловлагообеспеченности Западной Сибири и вопросы устойчивости развития сельского хозяйства // *Вест. Том. гос. ун-та*. 2010. № 331. С. 210–212.
- Мониторинг продуктивности экосистем / С. Г. Копысов, А. О. Елисеев // *Интеграционные проекты СО РАН*. 2022. Вып. 48. С. 111–116.
- Паромов В. В., Земцов В. А., Копысов С. Г. Климат Западной Сибири в фазу замедления потепления (1986–2015 гг.) и прогнозирование гидроклиматических ресурсов на 2021–2030 гг. // *Изв. Том. политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов*. 2017. Т. 328, № 1. С. 62–74.
- Продуктивность экосистем Северной Евразии [Электронный ресурс] // Базилевич Н. И. и мн. др. 2006. URL: <http://biodat.ru/db/prod/index.htm> (дата обращения: 25.02.2023).
- Раменский Л. Г. Введение в комплексное почвенно-геоботаническое исследование земель. М.: Сельхозгиз, 1938. 620 с.
- Раменский Л. Г. Проблемы и методы изучения растительного покрова: избр. работы. Л.: Наука. Ленингр. отделение, 1971. 334 с.
- Чертов О. Г., Грабарник П. Я., Шанин В. Н., Быховец С. С., Петропавловский Б. С., Припутина И. В., Фролов П. В., Зубнова Е. В. Динамические модели наземных экосистем для количественной оценки продуктивности растительности // *Раст. ресурсы*. 2019. Т. 55, № 2. С. 151–169.
- Farr T. G., Hensley S., Rodriguez E., Martin J., Kobrick M. The shuttle radar topography mission // *CEOS SAR Workshop*. Toulouse 26–29 Oct. 1999. Noordwijk, 2000. P. 361–363.
- Fick S. E., Hijmans R. J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas // *Int. J. Climatol*. 2017. Vol. 37. P. 4302–4315.
- Kopysov S. G., Chernova N. A., Klimova N. V. Validation of vegetation type modeling at a local level using a moisture scale // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2018. 211012032. 5 p.
- Kopysov S. G., Eliseev A. O., Chernova N. A., Klimova N. V., Dyukarev A. G., Pats E. N. Modern ecosystem processes in the area of the Tomsk water intake // *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. 2019. Vol. 10, N 2. P. 91–99.
- Williams J. R. The Erosion-Productivity Impact Calculator (EPIC). Technical Reference / US Department of Agriculture, 1997.
- Yang H., Yang D., Lei Z., Sun F. New analytical derivation of the mean annual water-energy balance equation // *Water Resource*. 2008. N 44. W03410.
- Zhou S., Yu B., Huang Y., Wang G. The complementary relationship and generation of the Budyko functions // *Geophys. Res. Lett.* 2015. Vol. 42. P. 1781–1790.

Assessment of hydrological and climate conditional productivity of ecosystems in the South-East Western Siberia

S. G. KOPYSOV, A. O. ELISEEV

*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of SB RAS
10/3, Akademicheskiiy ave., Tomsk, 634055, Russia
E-mail: wosypok@mail.ru; kuzoller@gmail.com*

The spatial divergence of climatic changes necessitates the creation of predictive models of the state of vegetation cover. Our proposed solution for spatial modeling of the biological productivity of natural ecosystems creates the basis for further quantitative assessment of the potential absorption of CO₂, which is currently considered one of the most urgent environmental issues. In the proposed work, using the methods of geo-analysis of growing conditions, an original technology for modeling the potential spread of biocenoses and their productivity has been developed, reflecting the internal attractor of the development of biocenoses under the influence of local hydrological and climatic conditions of their growth. The methodology was implemented for the territory of the south-east of Western Siberia within the framework of the publicly available GIS Saga based on a digital terrain model and data from the WorldClim 2.0 climate reanalysis. To forecast data for the period of the third decade of the XXI century, V. V. Paromov's regional climate forecast was used on the basis of an adaptive model – the exponential smoothing method. Verification of the simulation results was carried out on the basis of the database “Productivity of ecosystems of Northern Eurasia”. As a result, spatially distributed data were obtained in the form of rasters with high spatial resolution for the average long-term potential bioproductivity according to reanalysis data for the period 1970–2000 and predicted data for the period 2021–2030. Both positive and negative trends of potential bioproductivity for various natural zones of the south-east of Western Siberia have been revealed, due to the spatial divergence of changes in heat and energy resources and precipitation over the territory. In general, the observed warming in sufficiently drained areas contributes to an increase, and in hydro-morphic to a decrease in the biological productivity of agro and biocenoses.

Key words: bioproductivity, landscape and ecological modeling, HCC method, moisture scale, WorldClim, south-east of Western Siberia.